

Л. Свірська<sup>1</sup>; А. Марков<sup>1</sup>, канд. техн. наук;  
О. Студент<sup>1</sup>, докт. техн. наук; Ю. Никифорчин<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

<sup>2</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## ЕКСПЕРТИЗА ПРИЧИН ПОШКОДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ ТЕС

*Проведено експертизу пошкоджених диска та лопаток циліндра низького тиску парової турбіни ТЕС. Виявлено механізм повільного в часі експлуатації поширення тріщини на диску для фіксації робочих лопаток. Причиною втрати роботоздатності турбіни є докритичне підростання тріщини від внутрішньої поверхні диска в зоні концентрації напружень. Фрактографічно показано, що фретінг-корозія визначає стадію зародження тріщин і їх підростання за механізмом повздоовжнього зсуву до критичних розмірів. Цей чинник реалізується внаслідок порушення вимог щодо зазорів між хвостовиками лопаток і T-подібним пазом на ободі диска та за дії височастотного низькоамплітудного навантаження за усталеного режиму роботи парової турбіни. Наводнювання інтенсифікує ріст тріщини за механізмом відриву на етапі стабільного росту тріщини. Встановлено, що маневрений режим експлуатації ТЕС з частими зупинками технологічного процесу негативно впливає на роботоздатність елементів турбіни. Адже зупинки і запуски парової турбіни супроводжуються істотними перевантаженнями, які інтенсифікують наводнювання і фретінг-утому.*

L. Svirska, A. Markov, O. Student, Yu. Nykyforchyn

## EXPERTISE OF DAMAGE CAUSES OF STRUCTURAL ELEMENTS OF POWER PLANT STEAM TURBINE

*The expertise of damaged disk and turbine blades of low pressure cylinder of steam turbine was carried out. The subcritical crack growth mechanism on the disk during service has been revealed. The reason of workability loss of turbine is subcritical crack growth from internal surface of disk in and around of stress concentration. Using a fractography investigation it is shown that fretting-wear defines a crack initiation and crack growth up to critical length process using lengthwise shear mechanism. This factor is put into effect owing to breaking of requirements about gaps among blades shanks and T-groove on the disk and effect of high-frequency low-amplitude loading during stable service of steam turbine. Hydrogenation intensify crack growth using tearing-off mechanism on the stable crack growth phase. Manoeuvrable mode of power plant exploitation with often shutdowns of working process has a negative influence on workability of turbine units. Because of shutdowns and starting up of turbine are accompanied with considerable overloads that intensify hydrogenation and fretting-wear fatigue.*

Серед відповідальних елементів теплових електростанцій одне з чільних місць займають парові турбіни, які експлуатуються за впливу жорстких температурно-силових умов та наводнювального середовища, яким є пара. Їх пошкодження приводить не лише до зупинки технологічного процесу, але і загрожує масштабними руйнуваннями та життю обслуговуючого персоналу ТЕС. На сьогодні оцінка їх роботоздатності є особливо актуальною проблемою для України. Адже вже на кінець 2005 року кількість теплоенергетичного устаткування з терміном експлуатації 30 і більше років складало 80% [1]. Разом з тим для обґрунтованого продовження терміну їх експлуатації потрібна достовірна інформація про властивості саме експлуатованого металу. Проте багатофакторність експлуатаційних впливів ускладнює узагальнення інформації та наукове вирішення проблеми в цілому. До основних чинників, які викликають втрату металом початкової роботоздатності, відносять робочу температуру і тиск середовища та тривалість його експлуатації. Разом з тим, звертає на себе увагу такий технологічний чинник, як кількість зупинок технологічного процесу, котрі супроводжуються значними динамічними перевантаженнями (особливо під час зупинок в нерегламентованому режимі). Практика експлуатації ТЕС впродовж останніх 10-15 років за маневреного режиму роботи з частими пусками–зупинками технологічного процесу свідчить про те, що пошкодження конструктивних елементів виникають значно частіше.

Не дивлячись на застосування уточнених методів розрахунків, збільшення об'ємів експериментальних досліджень, підвищення механічних властивостей вживаних матеріалів і якості виготовлення деталей сучасних парових турбін, випадки їх пошкодження продовжують фіксуватися. Зокрема, пошкодження лопаткового апарату парових турбін у ФРН з 1967 по 1969 рр. становили 25-30% від загальної кількості пошкоджень, а у вартісному еквіваленті це відповідає 50% [2]. Враховуючи надзвичайно важливе значення надійності лопаткового апарату та тяжкі наслідки від їх пошкоджень, необхідно ретельно вивчати причини таких пошкоджень і брати до уваги отриманий досвід під час проектування нових агрегатів та експлуатації дієвих.

Мета роботи – провести експертизу пошкодження елементів турбіни в циліндрі низького тиску та зробити висновок про причини аварійної зупинки турбіни.

**Матеріали та методи досліджень.** Хімічний склад сталей з диска та лопаток циліндра низького тиску (ЦНТ) турбіни ВК-100-90 дослідили методом спектрального аналізу, результати якого наведено в таблицях 1, 2.

Таблиця 1 - Хімічний склад сталі з диска парової турбіни, ваг. %

C	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	S	P
0.32	2,8	0,91	0,29	0,59	0,41	0,053	0.039

Таблиця 2 - Хімічний склад сталі з лопаток парової турбіни, ваг. %

C	Cr	Mn	Si	Ni	Cu	Ti	Mo	S	P
0.21	13,72	0,36	0,77	0,34	0,16	0,09	0,11	0,075	0.055

Згідно з даними про хімічний склад сталей, вживаних для виготовлення таких елементів, зі всесвітньої мережі Internet (<http://www.1metal.com/info/steels/materials/34hn3m/>, [http://www.snab-info.com.ua/spravochnik/spr/properties\(252\).html](http://www.snab-info.com.ua/spravochnik/spr/properties(252).html)), хімічний склад, наведений в таблиці 1, відповідає сталі 34ХН3М, а в таблиці 2 – сталі 20Х13. Отже, диски виготовлені зі сталі 34ХН3М, а лопатки парової турбіни – зі сталі 20Х13. За хімічним складом досліджувана сталь 34ХН3М практично не виходить за рамки регламентованого. Разом з тим вона має дещо вищий вміст Si, S, P. Підвищений вміст останніх двох елементів свідчить про високу імовірність сегрегації цих елементів вздовж границь зерен, що може стати причиною схильності цієї сталі до зернограничного окрихчення. Що ж до хімічного складу сталі 20Х13, то спостерігається дещо занижений вміст Mn, Ni, Cu, Ti, але завищений Mo, S і P, що також може негативно впливати на роботоздатність лопаток.

Фрактографічні особливості поверхні реального руйнування ободу диска провели на растровому електронному мікроскопі Hitachi S-2600N.

**Результати візуального обстеження пошкоджених робочих лопаток та диска.** Обстеження робочих лопаток на роторі виявило відсутність бандажної стрічки та практично знищені лопатки однієї з ступеней. Частина лопаток вирвало з посадочного місця разом з частиною диска, на якому вони фіксувалися. Лопатки сильно zdeформовані і побиті, їх кінці затерті, але макротріщин на них не виявлено.

Аналіз відповідних частин макрозламу диска дозволяє стверджувати, що руйнування розпочалось в зоні максимальної концентрації напружень, створеної пазом диска. На обох половинках зламів чітко виділяється 2 фронти локального докритичного підростання тріщини за експлуатаційної температури (рис. 1). В межах цих підростань окисна плівка на поверхні зламу темна, тоді як долам вирізняється і вищою рельєфністю, і кольором окисної плівки (вона вкрита свіжою іржею).



Рисунок 1 – Відповідні частини з пошкодженого диска для утримування лопаток

Причиною докритичного підростання тріщин в диску для утримування лопаток може бути велика кількість пусків турбіни впродовж її експлуатації (~1600), які, безумовно, супроводжуються істотними перевантаженнями і можуть привести до втомного підростання тріщини в часі експлуатації. Адже в зв'язку з вимушеним переходом всієї енергетики України на маневрений режим роботи частота зупинок з наступним запуском агрегатів останнім часом істотно зросла. Це, безумовно, сприяє виникненню і поширенню подібних пошкоджень. Іншою причиною докритичного росту пошкоджень може бути і статичний докритичний ріст тріщини під впливом високих рівнів навантаження та робочого середовища. Не можна відкидати і синергетичного прояву цих двох механізмів докритичного росту тріщин. При цьому циклічні навантаження сприяють загостренню вершини тріщини, яка, за умов статичного підростання, має більший радіус вершини, і тим самим підвищують концентрацію напружень.

**Результати фрактографічної експертизи реального зламу ободу диска.** Зразки для фрактографічного аналізу реального зламу вирізали безпосередньо з частини ободу диска, відокремленої в часі експлуатації від диска разом з лопатками під час аварії.

На рис. 2 схематично показано переріз хвостового з'єднання лопатки з диском та зазначені зазори, які повинні дотримуватися. Руйнування диска відбулося від конструктивних концентраторів напружень в обох верхніх частинах Т-подібного паза в ободі диска. На лопатки діють відцентрові сили, які зростають зі збільшенням діаметра ступені парової турбіни і довжини лопаток, та зусилля парового потоку, які створюють максимальний згинаючий момент в їх кореневих перерізах [3]. За розрахунками розробників за дотримання зазорів, наведених на рис.2, ці зусилля не повинні приводити до руйнування ні лопаток, ні ободу диска турбіни. Разом з тим, якщо з якихось причин ці зазори зростають, то сили, котрі діють на лопатки, прикладаються до найслабших місць диска, якими є місця концентрації напружень Т-подібного паза.

Згідно з візуальним оглядом зруйнованої ступені, вимоги до зазорів в хвостовому з'єднанні були явно порушені. Це могло бути наслідком істотного перевантаження під час пошкодження, або зношування в часі тривалої експлуатації внаслідок фреттінг-утоми.

Фрактографічні дослідження зламу виявили, що вони вкриті щільною окисною плівкою, яка утворилася за високої температури експлуатації. Вона перешкождала виявленню фрактографічних деталей руйнування за високої роздільної здатності. Але навіть за невисоких збільшень (до 500) можна говорити про домінуючі механізми зародження і поширення руйнування ободу диска під час аварії.

Зародження тріщини в пошкоджені елементі відбувалося за механізмом фреттінг-утоми. Рис. 3 дозволяє розмірковувати про причини їх зародження, орієнтацію стосовно напрямку мікропереміщень та напружень, які при цьому виникають. Зі схеми випливає, що зародження тріщин від фреттінг-утоми відбувається внаслідок дії навантажень, які викликають повздожній зсув.

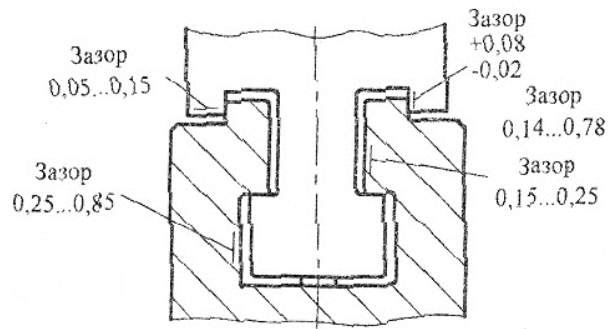


Рисунок 2 - Схема хвостового з'єднання лопатки з диском

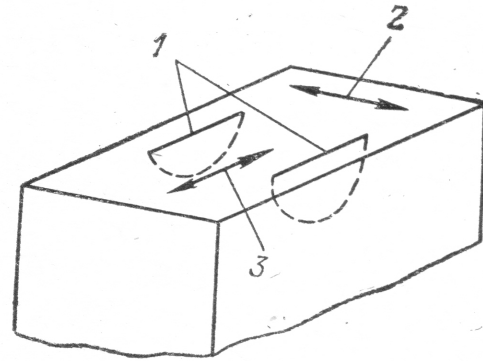


Рисунок 3 - Схема зародження втомних тріщин, коли напрям макропроковзування перпендикулярний до напрямку дії напружень: 1 – втомні тріщини, 2 – напрям макропроковзування, 3 – напрям дії напружень, які викликають деформування повздовжнім зсувом [4]

В підтвердження цієї схеми на поверхні ободу диска, в яку впиралися хвостовики лопаток, виявлено серію тріщин, паралельних до фронту макротріщини, яка привела до остаточного руйнування. Ці тріщини є декоровані слідами фретінг-корозії у вигляді стрічок з виразок (в нижній частині світлин на рис. 4а-в). Орієнтація цих тріщин дозволяє стверджувати, що виникли вони внаслідок фретінг-утоми від нерегламентованих циклічних переміщень хвостовиків лопаток в пазі ободу диска, зумовлених складною схемою навантаження лопаток в часі їх тривалої експлуатації.

Таким чином, на першому етапі пошкодження в конструктивному пазі ободу диска паралельно його ребру утворилися мікротріщини за механізмом фретінг-утоми. Вони сегментоподібні за формою і на фрактограмах виглядають як практично гладкі блискучі ділянки (рис. 4 а). За вищої роздільної здатності їх поверхні вкриті слідами у вигляді подряпин (рис. 4 б, в). Оскільки на тріщину після її зародження діють зсувові напруження, то продукти фретінг-корозії між її берегами можуть залишати по собі такі сліди. Про наявність таких продуктів фретінг-корозії свідчать також достатньо великі виразки у вигляді ямок діаметром до 30 мкм, які можуть бути слідами великих частинок. На деяких зі світлин їх можна спостерігати, особливо в околі вершини сегментоподібних тріщин від фретінг-утоми (рис. 4в).

Про природу утворення великих порожнин на етапі фретінг-утоми дає змогу судити світлина рис. 4г. На них зафіксована початкова стадія утворення ямок внаслідок контактування берегів тріщини. Рельєф зламу ще не пошкоджено притиранням берегів, і це дає змогу стверджувати, що перед утворенням ямок спочатку відбувається інтенсивна фретінг-корозія з утворенням характерних округлих слідів з частинкою в її центрі і сіткою мікротріщин від неї. Зрозуміло, що за подальшого тертя берегів тріщини проявиться синергетичний ефект нарощування товщини окисної плівки, об'єм якої перевищує об'єм неокисненого металу. Тому плівка при контакті берегів тріщини руйнується, а утворені при цьому частки інтенсифікують ріст тріщини фретінг-утоми в глибину за механізмом повздовжнього зсуву. Ці процеси відбуваються в тривалому проміжку часу стаціонарних умов експлуатації за багатоциклового високочастотного навантаження з невисокою амплітудою, яку визначає зазор між хвостовиками лопаток і поверхнями пазу диска.

Коли накопичується достатня кількість пошкоджень від фретінг-утоми, вони починають конкурувати з конструктивними концентраторами напружень у верхніх кутах паза диска і, тим самим, можуть визначати місце концентрації напружень (сумарна довжина сегментоподібних тріщин і їх глибина досягають певної критичної величини). При цьому стає можливим подальше поширення втомної тріщини вже не від напружень, що викликають повздовжній зсув (класична схема навантаження за типом ІІІ), а від напружень розтягу (класична схема навантаження за типом І). При цьому починають



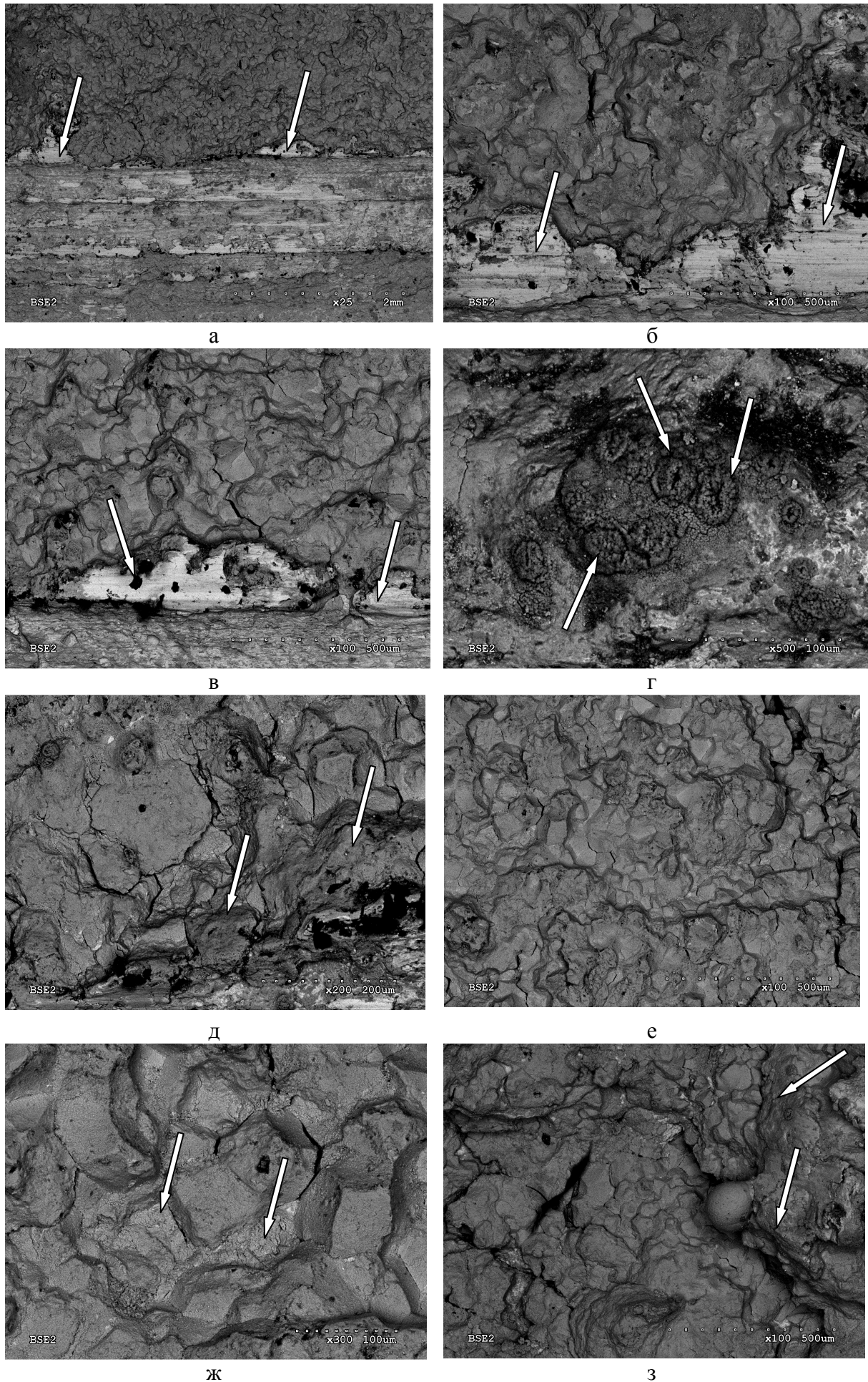


Рисунок 4 - Фрактограми зразків з реального зламу ободу диска на етапі зародження тріщини

відігравати особливу роль нестационарні умови експлуатації парової турбіни під час зупинок чи пусків. Адже при цьому виникають суттєві перевантаження і реалізується високочастотне навантаження з високою асиметрією. Зрозуміло, що за наявності пари чи конденсату процес росту втомної тріщини інтенсифікується. На фрактограмах при цьому спостерігається грубозернистий рельєф: на переході до підростання тріщини за схемою відриву в основному за кризьзеренним механізмом (рис. 4д).

З подальшим поглибленням тріщини, коли розмір зони передруйнування стає сумірним з розміром зерна, – практично за міжзеренним (рис. 4е). Лише у тих випадках, коли ріст вздовж границь зерен супроводжується істотним відхиленням траєкторії росту тріщини від магістрального напрямку, спостерігаються також локальні ділянки кризьзеренного росту (рис. 4ж). І це абсолютно логічно. Адже відомо [5], що з відхиленням тріщини від магістрального напрямку рівень коефіцієнта інтенсивності напружень в її вершині знижується, що може стати причиною навіть її зупинки на локальній ділянці фронту. Кризьзеренне руйнування на цій ділянці реалізується, коли на суміжних ділянках фронту тріщини зі сприятливо розташованими границями зерен тріщина істотно випередить затриману ділянку фронту тріщини. Це, як правило, супроводжується вторинним розтріскуванням.

В міру поглиблення тріщини рельєфність зламу зростає (рис. 4з), що свідчить про зростання швидкості її росту в часі експлуатації. При цьому перетинки між ділянками локальних підростань руйнуються зі значними слідами пластичної деформації.

Слід наголосити, що тривалість та умови експлуатації (температура 80...90 °С та наводнювальне середовище, яким є пара) аналізованого конструкційного елементу дозволяють з великою вірогідністю припустити, що саме наводнювання могло інтенсифікувати процес руйнування диска парової турбіни. Адже відомо, що саме за такої температури водень максимально пришвидшує субкритичний ріст тріщини в конструкційних сталях [6]. Крім того виявлений підвищений вміст сірки і фосфору в сталі диска може додатково знижувати його роботоздатність. Тому логічно пов'язати швидке поширення тріщини в диску ротора парової турбіни аж до руйнування з окрихчувальним впливом сегрегацій сірки та фосфору вздовж границь зерен та водню, абсорбованого металом в часі тривалої експлуатації.

### Висновки

1. Виявлено дві зони обширного докритичного (повільного у часі експлуатації) підростання тріщини на диску для фіксації робочих лопаток на роторі парової турбіни. Встановлено, що причиною втрати роботоздатності турбіни є докритичне підростання тріщини за експлуатаційних умов від внутрішньої поверхні диска в зоні концентрації напружень від Т-подібного паза для фіксації робочих лопаток. Миттєве злиття двох фронтів виявлених мікротріщин внаслідок досягнення в їх вершинах критичного напруженого стану привело до відокремлення одного з сегментів диска разом з лопатками.
2. Фрактографічним аналізом показано, що існує декілька чинників, відповідальних за пошкодження диска на роторі парової турбіни:
  - По-перше, це фретінг-корозія, яка визначає стадію зародження тріщин і їх підростання за механізмом повздовжнього зсуву до критичних розмірів, за яких вони починають конкурувати з конструктивним надрізом Т-подібного паза на диску за домінування у створюваній концентрації напружень. Цей чинник реалізується внаслідок порушення вимог щодо зазорів між хвостовиками лопаток і Т-подібним пазом на ободі диска та за дії високочастотного низькоамплітудного навантаження за усталеного режиму роботи парової турбіни.
  - По-друге, це можливий вплив наводнювання, яке безумовно інтенсифікує ріст тріщини за механізмом відриву на етапі стабільного її росту. І вплив цього наводнювання максимально проявляється саме за експлуатаційних параметрів

ЦНТ парової турбіни (температура пари 80...90 °С + можливий конденсат). Крім того в сталі 34ХНЗМ виявлено підвищений вміст сірки і фосфору, які можуть утворювати сегрегації вздовж границь зерен, тим самим окричуючи сталь і додатково знижуючи її роботоzдатність.

- По-третє, це можливий синергетичний вплив маневреного режиму експлуатації ТЕС з частими зупинками технологічного процесу на інтенсивність впливу перших двох чинників. Адже зупинки і запуски парової турбіни супроводжуються істотними перевантаженнями, які інтенсифікуватимуть наводнювання і фретінг-утому.

#### Література

1. Забара Ю. Вихід завжди є. – Обрій ПІБ, 2002. - №24 (82). - <http://www.obriy.pib.com.ua>
2. Leopold I. Laufshaufelschaden an axialen Dampfturbinen. - Der Maschinenchaden. – 1971. Bd. 44, N 3. – S. 81-89.
3. Турбины для теплових и атомних электростанций: Ученик для вузов. – 2-е узд., перераб. и доп. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; Под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 488 с.
4. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. Пер. с англ. / Под ред. Г.Н. Филимонова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1976. – 272 с.
5. Романив О.Н., Никифорчин Г.Н., Студент О.З. Об условиях инвариантности характеристик коррозионной трещиностойкости. – Физ.-хим. механика материалов. - 1981. -№3. - С. 24-33.
6. Nelson H.G., Williams D.P., Tetelman A.S. Embrittlement of ferrous alloys in a partially dissociated hydrogen environment – Met. Trans. – 1971. – 2, N4. – P. 953-959.

*Одержано 11.02.2008 р.*